

# 自動車駆動系の評価

<b>1. 内燃機関自動車</b>	… 3
<b>2. 電気自動車</b>	… 6
2-1 電動モーターの特性	
2-2 電動自動車各論	
<b>3. ハイブリッド車</b>	… 10
3-1 パラレルハイブリッド車	
3-2 スプリットハイブリッド車	
<b>4. 総合評価</b>	… 12

2012/10/22 版

## はじめに

日本においてエネルギー技術として再生可能エネルギー発電技術と同時に注目されているのが自動車を駆動する動力機関の高効率化技術です。

自動車の駆動系（動力機関と燃料供給系）に求められる機能は、軽量で高出力であること、出力調整が容易であることが挙げられます。その結果、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンがその主流でした。

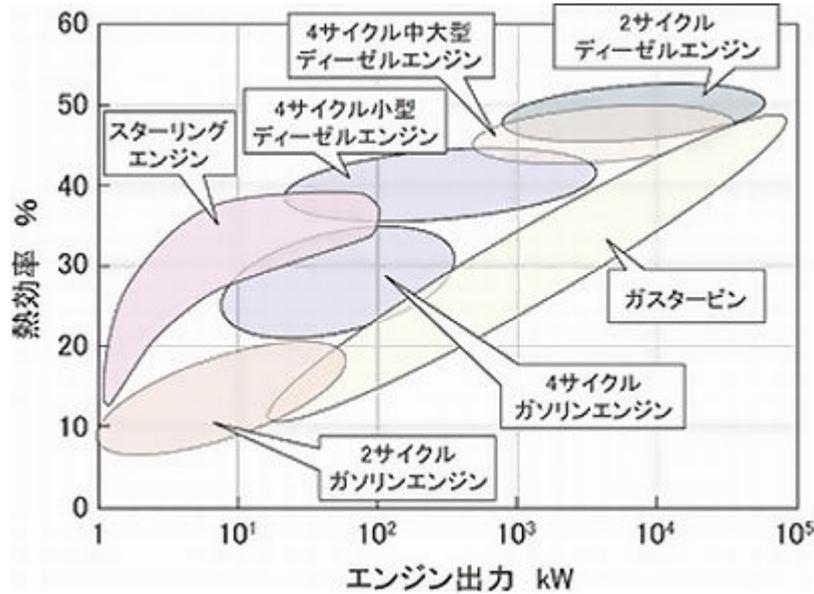
ところが近年、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化対策という名目で、“走行時に CO<sub>2</sub> を放出しない”動力機関として電動モーターの利用が注目され始めました。ここでは、多様化する自動車用の駆動系についての熱力学的な評価の視点を簡単にまとめておくことにします。

一般の機械装置が外に対して仕事をするのに対して、自動車の特殊性は自らを移動させることが目的だという点です。そこで問題になるのが駆動系が高効率であることだけではなく、自重が軽量であることが重要な要素となります。

一般の機械装置であれば定格運転時に最大効率を発揮すれば良いのに対して、自動車では道路状況によって低速から高速まで、下り勾配から上り勾配まで、負荷の幅が非常に広く、常に負荷が変動するのが常態です。そのため、負荷の変化に対して安定した性能を発揮し、負荷変動に対する応答が早く操作性が良いことも重要な要素となります。

こうした基本性能を満足した上で、同一の機能を得るために自動車の製造から廃棄までの全ライフサイクルにおいて鉱物資源、エネルギー資源利用効率を最大にすることが求められます。その意味で維持・補修の簡便さ、耐久性も大きな判断要因となります。

# 1. 内燃機関自動車



現在最も普及している自動車の駆動系は内燃機関です。内燃機関の出力と熱効率の関係の概要を図に示します。

自動車のエンジン出力は馬力（仏馬力：PS）で表すのが一般的です。PS と kW の換算式は次のとおりです。

$$1\text{PS} = 75 \text{ kgf m/s} = 735.49875\text{W} \approx 0.735\text{kW}$$

自動車用のエンジン出力は概ね  $10^2\text{kW} \sim 10^3\text{kW}$  の範囲と考えられます。この範囲では、4サイクルディーゼルエンジンが最も熱効率が高く、次いで4サイクルガソリンエンジン、ガスタービンエンジンとなります。

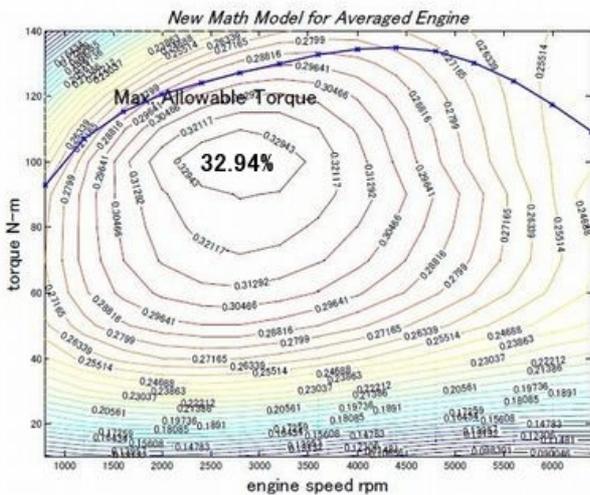


図 5-3-14 ガソリンエンジンモデルの効率マップ

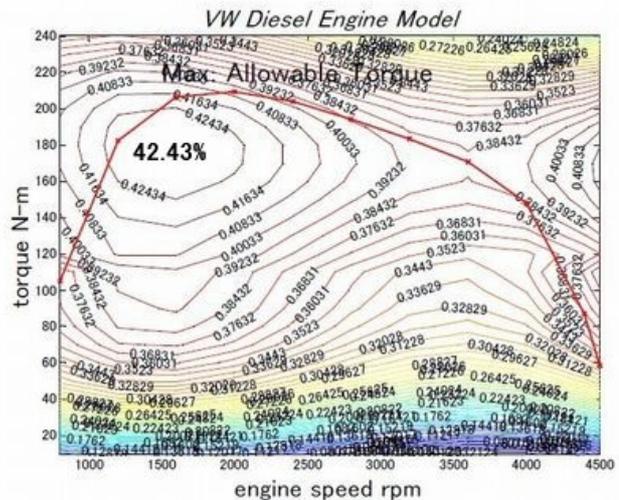


図 5-3-15 ディーゼルエンジンモデルの効率マップ

「日本自動車研究所」による「平成 15 年度燃料電池自動車に関する調査」

[http://www.jari.or.jp/jhfc/data/report/2005/pdf/result\\_ref\\_4.pdf](http://www.jari.or.jp/jhfc/data/report/2005/pdf/result_ref_4.pdf)

ガソリンエンジンとディーゼルエンジンの特性と熱効率の例を上図に示します。図中の

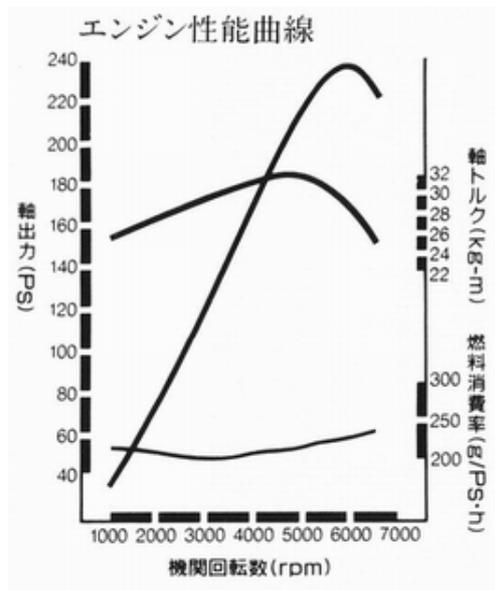
青と赤の実線は回転数（rpm：1分あたりの回転数）に対する最大トルク（N・m：力のモーメント）の特性を示しています。トルクを  $T$ （N・m）、回転数を  $r$ （rpm）とすると、エンジンの出力（仕事率）は次の式で表されます。

$$\text{エンジン出力} = \frac{2\pi \cdot T \cdot r}{60} (W) = \frac{\pi \cdot T \cdot r}{30} (W) = \frac{\pi \cdot T \cdot r}{30 \times 735.5} (PS) = 0.000142T \cdot r (PS)$$

図のコンターは熱効率を示しています。

エンジンの熱効率だけで判断すれば、ディーゼルエンジンはもっと自動車用の動力機関として普及しても良いように思えます。しかし、ガソリンエンジンに比べてディーゼルエンジンは高い圧縮比になるため、エンジンに高い剛性が必要となり重量が大きくなり、振動や騒音が大きくなる傾向があります。その結果、駆動系の重量が総重量に占める比率が高く、居住性を重視するで乗用車を中心とする小型自動車では熱効率の高いディーゼルエンジンを用いるよりも軽量で静穏なガソリンエンジンを用いる方が総合的に優れていると考えられます。

しかし、貨物用の大型トラックでは駆動系の重量や振動・騒音があまり問題にならないためにディーゼルエンジンを使用することになります。また、船舶や鉄道等の大型の運搬手段や、定置用の大出力動力機関としては主にディーゼルエンジンが使用されています。



ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンの性能曲線の模式図を上図に示します。ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンは、1000rpm以下の低回転側と4000~5000rpm以上の高回転側では極端にトルクが小さくなります。その間ではエンジン出力は回転数の上昇とともに上昇します。

ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン車は1000rpm以下の低回転域ではトルクが弱すぎて走行には利用できません。自動車の始動時には1000rpmよりも高い回転数に対してクラッチと変速機構を介して動輪に力を伝達することで対応します。

理想的には、ガソリンエンジンは熱効率 32.94%、ディーゼルエンジンは熱効率 42.43%

の範囲で運用するのが効果的です。高速道路や郊外での定常走行では、速度に対する適切なギア比を選択してこの範囲を保つのが最も燃費が良いことになります。

しかし、自動車は時速 0km/h～100km/h という範囲で走行することになりますから、必ずしも理想的な熱効率で運転することはできません。特に混雑した市街地のように発車・加速・減速・停止を頻繁に繰り返す必要が有る場合には熱効率は著しく低下します。その結果、ガソリンエンジン車の総合的な熱効率は 20% 台、ディーゼルエンジン車の総合的な熱効率は 30% 台にとどまります。

ガソリンエンジンとディーゼルエンジン車の弱点は、熱効率の良い運転範囲が限られており、しかも熱効率の良い運転範囲、トルクの最大値、出力の最大値が一致しないために、クラッチと複雑な変速機構によって調整を行いますが、どうしてもエネルギー損失が大きくなる傾向にあります。特に始動～低速運転～加速～減速～停止の繰り返しはエネルギー損失を大きくします。反面、高回転域では必要以上のエンジン出力を持っています。

近年、この欠点を補うために、エンジン回転数が低くなるとエンジンを停止することでアイドリング（無負荷運転）によるガソリン消費を減らす機構が採用されるようになりました。また、減速時に運動エネルギーを回生ブレーキ<sup>註)</sup>で電氣的に回収することで、電装機器に必要な電気を得ることで、走行中のオルタネーターによる負荷を軽減することでガソリン消費を抑える機構を持つものも登場しています。

#### 註) 回生ブレーキ

自動車の減速時に動輪の制動力で発電機を回すことで発電を行い、これを車載蓄電池に充電することで自動車を減速させると同時に運動エネルギーを電気エネルギーとして回収する機構。従来、乗用車では電気自動車とハイブリッド車で利用されてきたが、最近では鈴木自動車がガソリンエンジン車に回生ブレーキを搭載することで燃費の改善を行なっている。

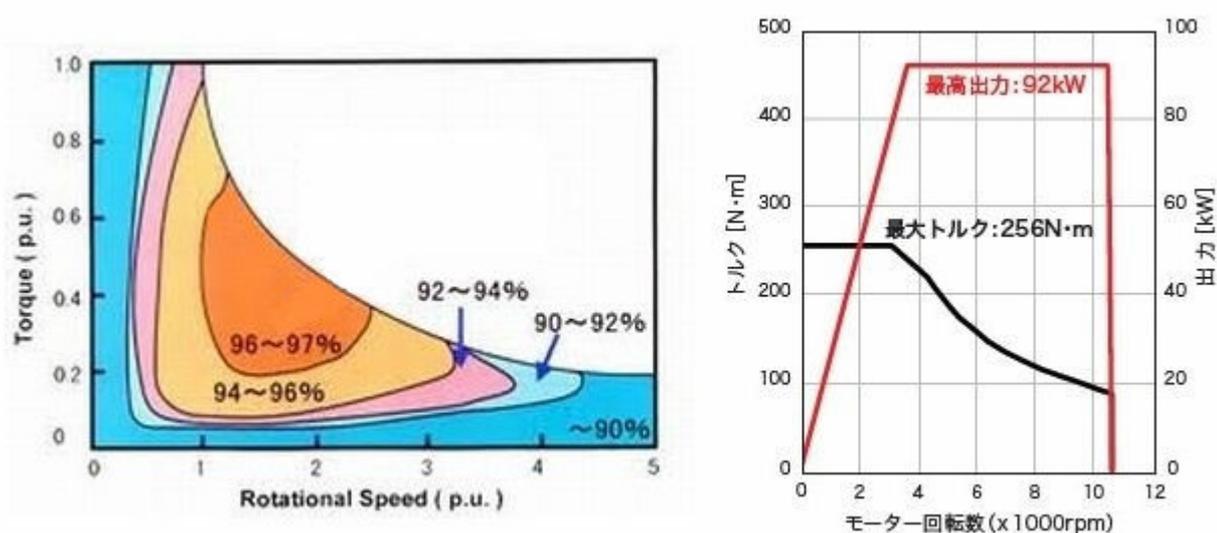
## 2. 電気自動車

本稿では通常のカテゴリで電気自動車と呼ばれる電動モーターと蓄電池によって構成されるシステムだけでなく、動力機関として電動モーターを使用する燃料電池車、シリーズハイブリッド車もこのカテゴリに含めることにします。

人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説の登場以降、人為的な CO<sub>2</sub> の排出量を抑制するためとして、走行時に CO<sub>2</sub> を放出しない動力装置として電動モーターの使用が注目されることになりましたが、その背景には小型で高出力の電動モーターと蓄電池が実用化したことが挙げられます。

まず電動モーターの特性から検討することになります。

### 2-1 電動モーターの特性



電動モーターの回転数に対するトルクのモード図を左図に示します。図のコンターは電動モーターの効率を示します。この効率は、電動モーターに入力した電力の内、どれだけが運動エネルギーとして有効に利用されたかを示しています。

右図は電動モーターの性能曲線のモード図です。電動モーターは低回転で高いトルクを得ることができるため、内燃機関とは異なり変速機がなくてもスムーズに始動～加速することができます。この特性は比較的低速の市街地走行では有利な特性です。また、電動モーター出力は高トルクの低回転域では回転数に比例して上昇し、高回転域では安定した出力を維持することができます。

### 2-2 電気自動車各論

本稿では、電動モーターを駆動力に使用する自動車を電気自動車と定義します。電気自動車は電力供給システムの違いで蓄電池を使うもの、燃料電池を使うもの、発電用内燃機関と蓄電池を併用するものの3種類が存在します。

## 2-2-1 電気自動車

従来、電動モーターと蓄電池の組み合わせは重量的に重すぎて、移動手段の駆動システムとして利用することはありませんでした。技術革新によって、小型・軽量で高出力の電動モーターと蓄電池が実用化されたことが電気自動車の普及の技術的な背景にあります。しかしながら、現状では内燃機関の自動車を全面的に置き換えるほどの能力があるとはいえません。

電気自動車が注目されているのは、従来の内燃機関自動車よりも総合的な性能が優れているというよりも、二つの社会的な要因からです。第一は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説に基づく CO<sub>2</sub> 放出量削減のために「走行時に CO<sub>2</sub> を放出しないこと」が重視されたことです。第二に、福島原発事故以前の日本のエネルギー政策として原子力発電所を増設することになっていたことによります。

第一点については、これは電気自動車技術を近視眼的に捉えた非科学的な主張です。

蓄電池に蓄えられる電力は発電所で石油や石炭や天然ガスを燃やして作ったものです。発電所における熱効率は 40% 程度です。発電所で得られた電力は送電線を介して電気自動車の車載蓄電池に充電します。発電所から蓄電池までの送電・充電の効率を 80% と仮定します。更に、蓄電池からの放電と電動モーターの効率を 80% と仮定します。

以上から、電気自動車の化石燃料に対するエネルギー産出比は次のとおりです。

$$0.40 \times 0.80 \times 0.80 = 0.256$$

回生ブレーキの併用で、10% の改善を見込んでもエネルギー産出比は 0.282 程度であり、内燃機関の自動車と同程度です。つまり、電気自動車に顕著な CO<sub>2</sub> 放出量削減効果はないのです。

小型軽量化された蓄電池ですが、内燃機関の自動車と同程度の航続距離を確保するためには車体重量が重くなるため余計にエネルギーを消費することになります。総合的に同一の走行性能を提供するために消費する化石燃料の量は内燃機関自動車の方が少ないと考えられます。

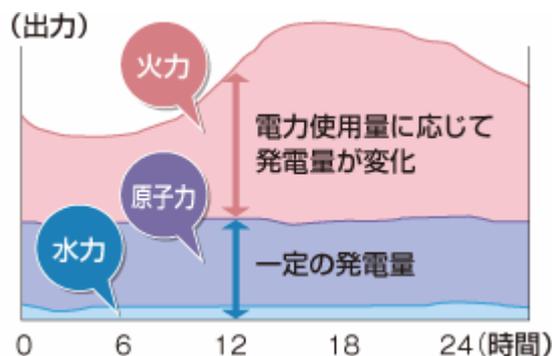
更に大容量の車載バッテリーは大変高価であり、しかも寿命もそれほど長くありません。電気自動車の製造や維持・補修に投入される鉱物資源やエネルギー資源量も内燃機関自動車よりも大きくなると考えられます。

以上から、総合的に見て、電気自動車でも内燃機関自動車一般を代替することに科学的な合理性はないようです。電気自動車の用途としては、都市部の充電を頻繁に行える環境下で、短距離の移動手段として利用する、あるいは屋内で排気ガスが放出できないような環境下で利用するなど、用途を限定して利用することが現実的です。

第二点について、むしろこれが電気自動車の普及を目指した本当の理由です。

日本の電力供給における電源構成において、原子力発電の割合が多くなってきたのは、

日本の国策によって原子力発電を行うことによって電力会社の利潤が増大する仕組みが法的に保証されていることによります。



模式図に示すように日中に比べて夜間の電力需要は大きく減少します。しかし、原子力発電は短時間の出力調整の行えない操作性の悪い発電方式なので、電力の日変化に追従して供給電力量を変化させることができません。そこで、原子力発電の夜間余剰電力をダンピング販売して電気温水器を普及させたり、使い道のない余剰電力の一部は揚水発電用に回しています。

更に、福島原発事故以前の日本のエネルギー政策では、CO<sub>2</sub> 温暖化対策として原子力発電所を大增設することにしていました。電力会社にとって、大幅に増加する原子力発電の夜間余剰電力を、自己負担で高価な揚水発電所を建設して自家消費するよりも、ダンピング販売してでも有効な需要に結びつける方が得策です。そこでこれまで無縁であった自動車用に夜間電力を格安で販売することが構想されたのです。このように電気自動車の導入は科学技術的な合理性ではなく、日本の特殊な原子力政策下の経済合理性によって推進されてきたのです。

しかし、福島原発事故によって状況は一変しました。原発の大增設はなく、電力価格は上昇することはあっても低下する要因は存在しません。おそらく経済合理性の基盤が崩れたことによって、市街地における短距離移動用あるいは排気ガスが出せない屋内利用などの限定された用途以外の電気自動車は淘汰されることになると考えられます。

### 2-2-2 燃料電池車

燃料である高圧水素の製造を含めた燃料電池という電力供給システムは、あまりにも迂回度が高く、エネルギー産出比が極めて低いシステムであり、車載電力供給システムとして一般的に普及することはありません。よほど特殊な条件下でない限り、燃料電池車を利用することに合理性が成立することはありません。

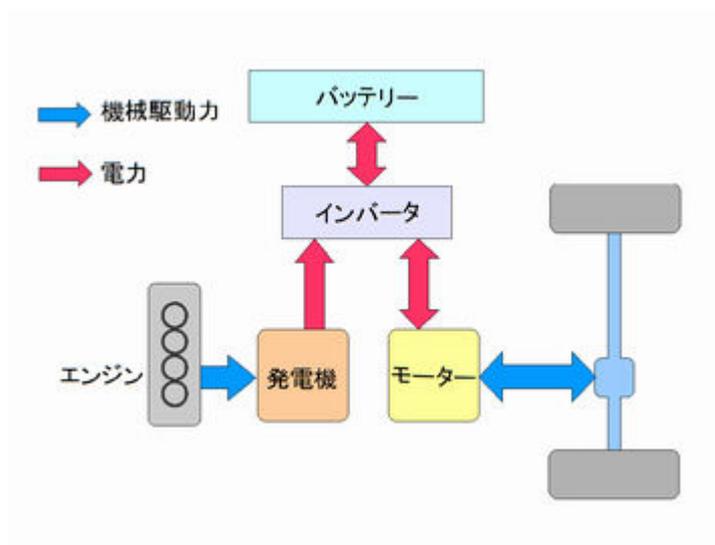
### 2-2-3 シリーズハイブリッド車

シリーズハイブリッド車の車載エンジンは発電専用のエンジンです。発電した電力は蓄

電池に蓄えて電動モーターを駆動します。電動モーターは動輪を駆動する一方、減速時には回生ブレーキとして運動エネルギーを電力として回収します。

エンジンは最も熱効率の良い状態で定常的な発電を行うため、発電の熱効率はガソリンエンジン使用の場合で30%程度が見込めます。蓄電池からの放電と電動モーターの機械的な損失と回生ブレーキによる電力回収を考慮すれば、おそらく総合的に自動車の駆動力に有効に使われる仕事量は、20%代後半～30%程度だと考えられます。

ガソリンエンジン車に比べて発電専用のエンジンはかなり小型化が可能ですが、そのかわり蓄電池の大型化と駆動用の電動モーターが必要になります。



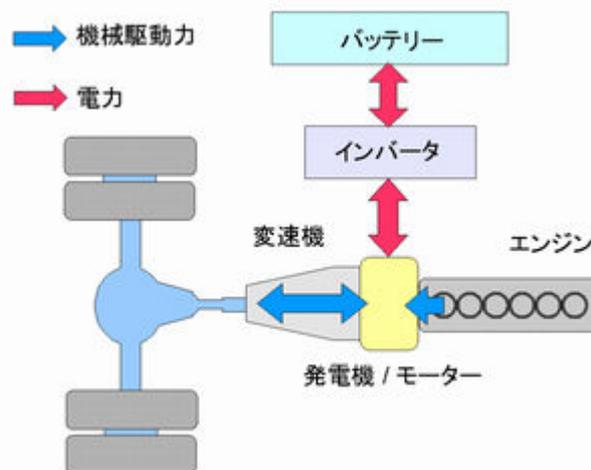
### 3. ハイブリッド車

ハイブリッド (hybrid) は、「2つ (またはそれ以上) の異質のものを組み合わせ一つの目的を成すものを言う。(Wikipedia)」という意味です。通常ハイブリッド車とは動力機関として内燃機関と電動モーターを併用するものという意味で使われます。この意味でシリーズハイブリッド車は電気自動車の範疇に分類します。

ハイブリッド車の発想は、低回転域でトルクが小さく熱効率が著しく悪化する内燃機関の欠点を低回転域で大きなトルクを発生する電動モーターの特性で補い、高回転域で余っている内燃機関の出力を発電機駆動用に利用し、電動モーター駆動用の車載バッテリーに充電することで総合的な熱効率の向上を狙ったものです。同時に回生ブレーキによって減速時に運動エネルギーを電気として回収します。

#### 3-1 パラレルハイブリッド車

パラレルハイブリッド車は専用の発電機を持たず、電動モーターを発電機と兼用しています。主要な動力を内燃機関 (エンジン) で供給し、発車から低速走行、あるいは内燃機関だけでは出力が足りない場合に電動モーターで動力を供給します。変速機とクラッチが必須です。クラッチは変速機と電動モーターの間と、電動モーターと内燃機関の間の2箇所にあります。



電動モーターは発電機を兼ねるため、発電と動力の供給を同時に行うことはなく、発電を行うのは内燃機関の出力に余裕のある場合と減速時です。減速時には内燃機関と電動モーターの間のクラッチを開放して、電気自動車と同様に、電動モーターは回生ブレーキとして運動エネルギーを電力として回収します。

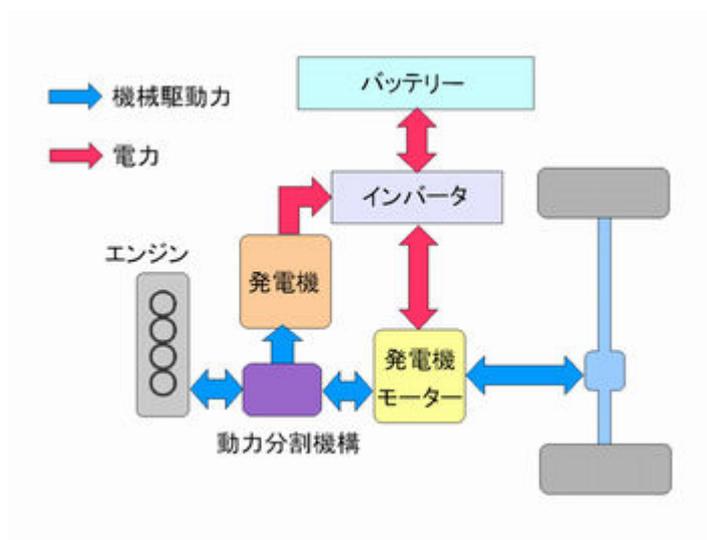
最近では内燃機関自動車の電装機器が増えているために走行中の電気使用量は増える傾向にあります。また内燃機関自動車にもオルタネーター (発電機) が装備されているだけでなく内燃機関始動用のスターターモーター (セルモーター) という電動モーターが装備されています。

パラレルハイブリッド車はオルタネーターとスターターモーターを統合して、一つの電動モーター兼発電機を装備し、これを走行用の動力供給にも利用していると考えられます。

### 3-2 スプリットハイブリッド車

スプリットハイブリッド車は、電動モーター兼発電機の他に専用の発電機を持っています。内燃機関はできるだけ負荷変動を抑えて熱効率の良い運転を行い、出力は動力分割機構を介して専用発電機と動輪駆動用に分割されます。

スプリットハイブリッド車は主に電動モーターで駆動され、内燃機関は主に発電に使用され余裕が有る場合や電動モーターだけでは出力が不足する場合に内燃機関の出力を動輪駆動に振り分けます。その意味で、スプリットハイブリッド車はシリーズハイブリッド車に近いといえます。減速時には電動モーターが回生ブレーキ（発電機）として働きます。



スプリットハイブリッド車はパラレルハイブリッド車に比較して燃費が良いといわれています。そのかわり機構的にはかなり複雑な構造になります。

#### 4. 総合評価

以上を総合的に判断すると、電気自動車の内、燃料電池車にはまったく実用化の可能性はないと考えられます。蓄電池による電気自動車については市街地や小規模にまとまったコミュニティの中での移動や屋内施設での使用など、限定された用途において合理性のある場合に限って利用すべき技術です。原子力発電の無駄な余剰電力のダンピング販売が行われなくなれば、電気自動車が一般化することはありません。

いわゆる自動車の駆動系としては今後とも内燃機関自動車と、これに加えてハイブリッド車が主要なものになると考えられます。

既に触れたように近代的な内燃機関自動車にはオルタネーターとスターターモーターが装備されており、ハイブリッド車との境界は曖昧なものなのかもしれません。用途に適した内燃機関・電動モーター・発電機・蓄電池の全体的なバランスを選択することになるでしょう。総合的には、燃費に著しい差がなければ、できるだけ単純で維持・補修が容易な駆動系を選択することが望ましいでしょう。

その意味では駆動系として内燃機関と電動モーターが相互に影響しあうパラレルハイブリッド車やスプリットハイブリッド車よりも、内燃機関自動車やシリーズハイブリッド車のような単一の動力機関で駆動する方が望ましいと考えます。

内燃機関の改良が進んでいる現在、レアメタルなどの希少資源を大量に使用する高性能蓄電池や電動モーターを必要とするシリーズハイブリッド車よりも内燃機関自動車が、全ライフサイクルに必要な総鉱物資源量とエネルギー資源量の消費が少なく、総合的に優れていると考えます。内燃機関については、ディーゼルエンジンの小型軽量化によって乗用車への適用が増加することになるでしょう。